

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-217000  
 (43)Date of publication of application : 02.08.2002

(51)Int.CI

H05H 13/04  
G01T 1/29

(21)Application number : 2001-011595  
 (22)Date of filing : 19.01.2001

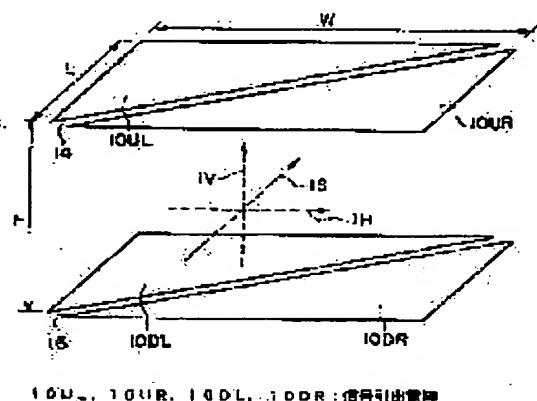
(71)Applicant : HITACHI LTD  
 (72)Inventor : KOSEKI KUNIO  
 SAITO KAZUYOSHI

## (54) BEAM POSITION MONITOR AND SYNCHROTRON USING THIS

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To measure a horizontal direction position and a perpendicular direction position of a beam using the same signal pulling-out electrodes.

**SOLUTION:** Four signal pulling-out electrodes 10UL to 10DR, which make electric charge accompanied by passage of a beam induce, are formed in a triangle form, respectively. These two signal pulling-out electrodes are arranged by dividing them into 2 pieces for each upper and lower ones based on a design orbit 1s of the beam as a basis. An upper side level surface is formed by the two signal pulling-out electrodes 10UL and 10UR that have been arranged at the upper side, and a gap 14 of a straight-line shape, which crosses aslant to the advance direction of the beam, is formed between these electrodes. An lower side level surface is formed by the two signal pulling-out electrodes 10DL and 10DR that have been arranged at the lower side, and a gap 16 of a straight-line shape, which crosses aslant to the advance direction of the beam is formed between these electrodes. The four signal pulling-out electrodes 10UL to 10DR measure the beam positions of the horizontal direction and the perpendicular direction.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 14.08.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C) 1998,2003 Japan Patent Office

**BEST AVAILABLE COPY**

(19)日本国特許庁 (JP)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-217000

(P2002-217000A)

(43)公開日 平成14年8月2日(2002.8.2)

(51) Int.Cl.  
H 05 H 13/04  
G 01 T 1/29

識別記号

F I  
H 05 H 13/04  
G 01 T 1/29

テマコード(参考)  
R 2 G 0 8 5  
Q 2 G 0 8 8  
A

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 18 頁)

(21)出願番号 特願2001-11595(P2001-11595)

(22)出願日 平成13年1月19日(2001.1.19)

(71)出願人 000005108

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72)発明者 小関 国夫

茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株

式会社日立製作所電力・電機開発研究所内

(72)発明者 齋藤 一義

茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株

式会社日立製作所電力・電機開発研究所内

(74)代理人 100098017

弁理士 吉岡 宏嗣

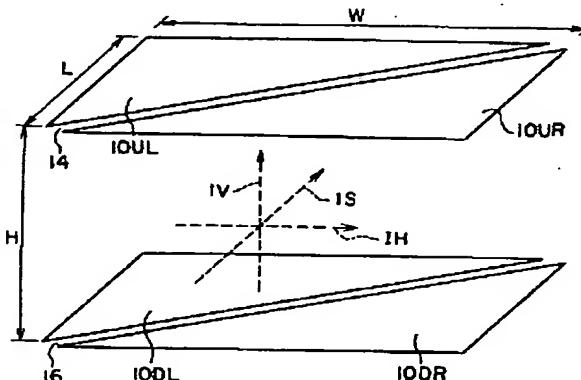
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 ビーム位置モニタおよびこれを用いたシンクロトロン

## (57)【要約】

【課題】 同じ信号引出電極を用いてビームの水平方向位置と垂直方向位置を測定すること。

【解決手段】 ビームの通過に伴う電荷を誘起させる4個の信号引出電極10UL～10URをそれぞれ三角形形状に形成し、これら信号引出電極をビームの設計軌道1sを基準に上下に2個ずつ分けて配置し、上側に配置された2個の信号引出電極10UL、10URによって上側の水平面を形成し、これらの電極の間にビームの進行方向に対して斜めに交差する直線状の間隙14を形成し、下側に配置された2個の信号引出電極10DL、10DRによって下側の水平面を形成し、これらの電極間にビームの進行方向に対して斜めに交差する直線状の間隙16を形成し、4個の信号引出電極10UL～10URによって水平方向および垂直方向のビーム位置を測定する。



10UL, 10UR, 10DL, 10DR:信号引出電極

## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 ビームの伝送路を構成する真空容器と、基準電位が与えられて前記真空容器内に配置された基準電極と、前記真空容器内におけるビームの設計軌道を基準に上下に一対ずつ分かれて配置されビームの通過に伴う電荷を誘起させる4個の信号引出電極と、前記基準電極を基準電位として前記各信号引出電極に誘起された電位の信号をそれぞれ出力する4個の信号引出端子とを備え、前記信号引出電極のうち上側に配置された2個の信号引出電極はそれぞれ上側の水平面を形成し、下側に配置された2個の信号引出電極はそれぞれ下側の水平面を形成してなるビーム位置モニタ。

【請求項 2】 請求項 1 に記載のビーム位置モニタにおいて、前記信号引出電極のうち上側に配置された2個の信号引出電極および下側に配置された2個の信号引出電極は、それぞれ前記ビームの進行方向に対して斜めに交差する直線状の間隙を間にして相対向して配置されてなることを特徴とするビーム位置モニタ。

【請求項 3】 請求項 1 または 2 に記載のビーム位置モニタにおいて、前記4個の信号引出電極はそれぞれ前記水平面に対して垂直な垂直面を形成し、かつ前記各水平面と前記各垂直面によって矩形形状の枠体を形成してなるとともに、上側に配置された一方の信号引出電極の垂直面および下側に配置された一方の信号引出電極の垂直面は、それぞれ鉛直軸に対して斜めに交差する直線状の間隙を間にして上下に分かれて配置され、上側に配置された他方の信号引出電極の垂直面および下側に配置された他方の信号引出電極の垂直面は、それぞれ鉛直軸に対して斜めに交差する直線状の間隙を間にして上下に分かれて配置されてなることを特徴とするビーム位置モニタ。

【請求項 4】 請求項 1 に記載のビーム位置モニタにおいて、前記信号引出電極のうち上側に配置された2個の信号引出電極および下側に配置された2個の信号引出電極は、それぞれ前記ビームの進行方向に沿った直線状の間隙を間にして相対向して配置されてなることを特徴とするビーム位置モニタ。

【請求項 5】 請求項 1 または 4 に記載のビーム位置モニタにおいて、前記4個の信号引出電極はそれぞれ前記水平面に対して垂直な垂直面を形成し、かつ前記各水平面と前記各垂直面によって矩形形状の枠体を形成してなるとともに、上側に配置された一方の信号引出電極の垂直面および下側に配置された一方の信号引出電極の垂直面は、それぞれ鉛直軸に対して直交する直線状の間隙を間にして上下に分かれて配置され、上側に配置された他方の信号引出電極の垂直面および下側に配置された他方の信号引出電極の垂直面は、それぞれ鉛直軸に対して直交する直線状の間隙を間にして上下に分かれて配置されてなることを特徴とするビーム位置モニタ。

【請求項 6】 請求項 1、2、3、4 または 5 のうちい

ずれか 1 項に記載のビーム位置モニタにおいて、前記4個の信号引出端子から出力される信号を演算処理してビームの設計軌道からの変位を示す水平方向位置および垂直方向位置を算出する信号処理回路を備えてなることを特徴とするビーム位置モニタ。

【請求項 7】 請求項 6 に記載のビーム位置モニタにおいて、前記信号処理回路は、上側に配置された一方の信号引出電極から出力された第 1 の信号と前記一方の信号引出電極に相対向して下側に配置された一方の信号引出電極から出力された第 2 の信号との和を演算する第 1 の演算回路と、上側に配置された他方の信号引出電極から出力された第 3 の信号と前記他方の信号引出電極に相対向して下側に配置された他方の信号引出電極から出力された第 4 の信号との和を演算する第 2 の演算回路と、前記第 1 の演算回路の演算値と前記第 2 の演算回路の演算値との差と和の比を基に前記ビームの設計軌道からの水平方向変位となるビームの水平方向位置を算出する水平方向位置算出回路と、前記第 1 の信号と前記第 3 の信号との和を演算する第 3 の演算回路と、前記第 2 の信号と前記第 4 の信号との和を演算する第 4 の演算回路と、前記第 3 の演算回路の演算値と前記第 4 の演算回路の演算値との差と和の比を基に前記ビームの設計軌道からの垂直方向変位となるビームの垂直方向位置を算出する垂直方向位置算出回路とから構成されてなるとを特徴とするビーム位置モニタ。

【請求項 8】 荷電粒子によるビームを前段加速器から入射する入射装置と、所定のエネルギーまで加速されたビームを出射する出射装置と、前記入射装置と前記出射装置とを結ぶ環状のビーム伝送路中のビームに磁場を与えて前記ビームをビームの設計軌道に沿って偏向させる偏向電磁石と、前記ビーム伝送路中のビームに対して高周波加速電圧を印加して前記ビームを加速する高周波加速空洞と、前記ビーム伝送路中のビームを水平方向に収束させる収束型四極電磁石と、前記ビーム伝送路中のビームを垂直方向に収束させる発散型四極電磁石とを有するシンクロトロンにおいて、前記ビーム伝送路中のビームの位置を監視するビーム位置モニタとして、請求項 1 ～ 7 のうちいずれか 1 項に記載のビーム位置モニタを備えてなることを特徴とするシンクロトロン。

【請求項 9】 荷電粒子によるビームを前段加速器から入射する入射装置と、所定のエネルギーまで加速されたビームを出射する出射装置と、前記入射装置と前記出射装置とを結ぶ環状のビーム伝送路中のビームに磁場を与えて前記ビームをビームの設計軌道に沿って偏向させる偏向電磁石と、前記ビーム伝送路中のビームに対して高周波加速電圧を印加して前記ビームを加速する高周波加速空洞と、前記ビーム伝送路中のビームを水平方向に収束させる収束型四極電磁石と、前記ビーム伝送路中のビームを垂直方向に収束させる発散型四極電磁石とを有するシンクロトロンにおいて、前記ビーム伝送路中のビーム

ムの位置を監視するビーム位置モニタとして、請求項6または7に記載のビーム位置モニタを備えてなるとともに、前記信号処理回路により算出されたビーム位置とビームの設計軌道との差から前記ビーム伝送路中のビームの軌道を補正するための励磁量を算出する励磁量算出手段と、前記励磁量算出手段の算出による励磁量に従った電磁力を前記ビーム伝送路中のビームに作用させて前記ビームの軌道を補正するステアリング電磁石とを備えてなることを特徴とするシンクロトロン。

【請求項10】荷電粒子によるビームを前段加速器から入射する入射装置と、所定のエネルギーまで加速されたビームを出射する出射装置と、前記入射装置と前記出射装置とを結ぶ環状のビーム伝送路中のビームに磁場を与えて前記ビームをビームの設計軌道に沿って偏向させる偏向電磁石と、前記ビーム伝送路中のビームに対して高周波加速電圧を印加して前記ビームを加速する高周波加速空洞と、前記ビーム伝送路中のビームを水平方向に収束させる収束型四極電磁石と、前記ビーム伝送路中のビームを垂直方向に収束させる発散型四極電磁石とを有するシンクロトロンにおいて、前記ビーム伝送路中のビームの位置を監視するビーム位置モニタとして、請求項6または7に記載のビーム位置モニタを備えてなるとともに、前記偏向電磁石の磁場強度を検出する磁場強度検出手段と、前記磁場強度検出手段の検出による磁場強度に従って高周波加速電圧に関する周波数設定値を算出する周波数設定値算出手段と、前記信号処理回路により算出されたビーム位置とビームの設計軌道との差から高周波加速電圧に関する周波数補正量を算出する周波数補正量算出手段と、前記高周波加速空洞に高周波加速電圧を供給する発振器と、前記周波数設定値算出手段の算出による周波数設定値と前記周波数補正量算出手段の算出による周波数補正量とを加算して得られた演算値に従って前記発振器の出力による高周波加速電圧の周波数を補正する周波数補正手段と、前記信号処理回路の処理により得られてバンチ形状信号を基に前記ビーム伝送路中のビームによる位相幅振動を減衰させるための高周波加速電圧に関する電圧補正量を算出する電圧補正量算出手段と、前記高周波加速空洞から発生する高周波加速電圧を検出する高周波加速電圧検出手段と、前記電圧補正量算出手段により算出された電圧補正量と前記高周波加速電圧検出手段により検出された高周波加速電圧とを加算して得られた演算値に従って前記発振器の出力による高周波加速電圧の振幅を補正する振幅補正手段とを備えてなることを特徴とするシンクロトロン。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、ビーム位置モニタに係り、特に、荷電粒子ビームをシンクロトロン中で周回、加速する際、荷電粒子の位置を測定するに好適なビーム位置モニタおよびこれを用いたシンクロトロンに関

する。

【0002】

【従来の技術】シンクロトロンは、環状の真空ダクト内で荷電粒子ビーム（以下、ビームという。）を周回させながら、所定のエネルギーまで加速するための装置として、癌治療用医療機器等に用いられている。

【0003】この種のシンクロトロンは、ビームを前段加速器から入射する入射装置と、所定のエネルギーまで加速されたビームをビーム利用設備（医療機器）に出射する出射装置と、入射装置と出射装置とを結ぶ環状の真空ダクト中のビームに磁場を与えてビームをビームの設計軌道に沿って偏向させる偏向電磁石と、真空ダクト内のビームに対して高周波加速電圧を印加してビームを加速する高周波加速空洞と、真空ダクト中のビームを水平方向に収束させる収束型四極電磁石と、真空ダクト内のビームを垂直方向に収束させる発散型四極電磁石と、真空ダクト中のビームの位置を測定するビーム位置モニタと、ビーム位置モニタによって得られたビーム位置情報からビームの軌道を補正するためのステアリング電磁石とを備えて構成されている。

【0004】上記構成によるシンクロトロンにおいて、高周波線形加速器や静電加速器などの前段加速器からビームが入射されると、このビームは進行方向に一様に連続な電荷密度分布を持って真空ダクト内を周回する。このとき高周波加速空洞に高周波電圧を印加すると、進行方向への収束力により、ビームは高周波電圧のある位相を中心にして集団（バンチ）化する。

【0005】その後、高周波電圧の周波数を上昇させ、バンチ中心の高周波電圧に対する位相を加速位相側にずらすこと、周回ビームの運動量が増加する。また、ビームの運動量増加による周回周波数の上昇に同期して高周波電圧の周波数をさらに増加させる制御が行われる。

【0006】このとき、シンクロトロンを周回するビームは予め定めた設計軌道を通り、偏向電磁石によって偏向される。ここで、ビーム中の荷電粒子の電荷をe、運動量をp、磁場強度をB、磁場での偏向による曲率半径をρとすると、 $p = e B \rho$ の関係にあることが知られており、シンクロトロンでは曲率半径ρを一定に保つために、加速によるビームの運動量pの増加に伴って、偏向電磁石の磁場強度Bを増加させ、ビームの中心軌道が常に設計軌道を通るような制御が行われる。また、ビームを水平方向および垂直方向へ収束させるための四極電磁石の磁場強度もビームの運動量の増加に同期して増加させる制御が行われる。

【0007】ビームの運動量増加率と磁場強度の変化率との間で同期を通る方法としては、偏向電磁石の磁場強度を磁場測定用サーチコイルで測定し、磁場強度の変化毎に制御クロック（Bクロック）を発生し、Bクロックを基に高周波加速電圧の周波数を決定する方法がある。

【0008】しかし、この方法によっても、偏向電磁石

の磁場強度変化と高周波電圧の周波数変化に同期が取れないと、ビームは真空ダクトなどに衝突して失われビーム損失が生じる。そこで、ビーム位置モニタによってビームの設計軌道からの変位を測定し、ビームが設計軌道を周回するために必要な高周波電圧の周波数を算出し、この算出値にしたがって高周波加速空洞に対して適切な周波数の高周波加速電圧を印加するようになっている。

【0009】この高周波加速電圧によって進行方向への収束力を受けて、パンチ化されたビームは、ビーム進行方向に伸縮（パンチ形状振動）しながらシンクロトロン内を周回することになる。

【0010】このパンチ形状振動が激しくなると、ビームは安定条件から外れ、ビーム損失に繋がるので、高周波加速電圧の振幅を適切に制御する必要がある。そこで、ビーム位置モニタによって、ビームのパンチ形状振動を測定し、この測定結果を基に、高周波加速電圧の振幅を制御することが行われている。

【0011】一方、シンクロトロンに設置される偏向電磁石や四極電磁石などの据付けに誤差が生じたり、磁場強度に誤差が生じたりすると、ビームは設計軌道からはずれた軌道を周回する。そしてビームの設計軌道からの変位が大きくなると、ビーム損失に繋がるので、ビーム位置モニタによって得られたビーム位置情報を基に、ビームが実際に通る軌道の設計軌道からの歪み（COD）を軌道補正用電磁石（ステアリング電磁石）などで補正することが行われている。

【0012】主にシンクロトロンにおいて用いられているビーム位置モニタとしては、三角電極型ビーム位置モニタがある。この三角電極型ビーム位置モニタに関しては、例えば、H. Kozioł, 「Beam diagnostics for accelerators」(CAS, CERN Accelerator School, Fifth general accelerator physics course, proceedings) に記載されているものがあり、三角電極型ビーム位置モニタには、水平方向のビーム位置測定用と、垂直方向のビーム位置測定用の2種類がある。

【0013】水平方向のビーム位置測定用三角電極型ビーム位置モニタは、例えば、図11、図12および図13に示すように、基準電位を与えるための接地電極40cと、ビームの設計軌道110C(1S)を中心にして上下に分かれて配置された4個の信号引出電極20UL、20UR、20DL、20DRと、真空容器40Bと、2個の信号出力用端子40Aとを備えて構成されている。上下2個の電極20ULと20DLは導体20Aを介して互いに接続され、上下2個の電極20URと20DRは導体20Bを介して互いに接続され、同一平面上にある2個の信号引出電極20ULと20URおよび2個の信号引出電極20DRと20DLは、それぞれ斜めの切り込みによって分断され、三角形形状に形成されている。

【0014】一方、垂直方向のビーム位置測定用三角電極型ビーム位置モニタは、図14に示すように、三角形形状の4個の信号引出電極17UL、17UR、17DL、17DRがそれぞれビーム601の進行方向に対して左右に分かれて配置され、上側に配置された2個の電極17UL、17URは互いに導体20Cを介して接続され、下側に配置された2個の電極17DL、17DRは互いに導体20Dを介して接続されている。そして、信号引出電極17ULと電極17DLとの間および信号引出電極17URと電極17DRとの間には鉛直軸に対して斜め方向に交差する間隙（切り込み）が形成されており、この間隙によって上下の信号引出電極が分断されている。さらに、上側の2個の電極17UL、17URと下側の2個の電極17DL、17DRはそれぞれ2個の信号出力用端子40Aに接続されている。

【0015】三角電極型ビーム位置モニタによってビーム位置を測定する際には、以下に示す測定原理が採用されている。

【0016】具体的には、水平方向のビーム位置測定用三角電極型ビーム位置モニタの場合には、図11に示すように、ビームの通過に伴って各信号引出電極20R、20L上には、静電誘導によってビームからの距離に応じた電荷 $q_R$ および $q_L$ が誘起される。例えば、ビームの設計軌道110Cから水平方向にx変位した位置をビームが通過すると、ビームの長さ110Aを各信号引出電極上に投影した長さ $L_R$ および $L_L$ は、電荷 $q_R$ および $q_L$ に比例した量となり、信号引出電極20L、20Rと接地電極40Cによって決定される対地静電容量をCとすると、各信号出力端子40Aからの出力電圧 $V_R$ 、 $V_L$ は以下の式で表される。

【0017】

【数1】

$$V_R = \frac{q_R}{C} = \frac{eN}{C} \frac{L_R}{L} = \frac{eN}{C} \left( \frac{x}{W} + \frac{1}{2} \right) \quad \dots \dots (1)$$

【0018】

【数2】

$$V_L = \frac{q_L}{C} = \frac{eN}{C} \frac{L_L}{L} = \frac{eN}{C} \left( -\frac{x}{W} + \frac{1}{2} \right) \quad \dots \dots (2)$$

ここで、eは素電荷、Nはビーム位置モニタ内にあるビームの粒子数、Lはビーム進行方向におけるビーム位置モニタの長さ、Wは水平方向におけるビーム位置モニタの長さである。

【0019】また、荷電粒子ビームの通過によってビーム位置モニタの各信号引出電極上に誘起された電荷の時間変化量を $dq/dt$ 、ビーム位置モニタからの信号を増幅するための前置増幅器の抵抗をR、ビーム位置モニタの信号引出電極と接地電極とによって決定される対地静電容量をCとすると、ビーム位置モニタの電気的等価回路は図14に示すような回路構成となる。ここで、Vは各信号引出電極からビーム位置に比例して出力される

出力電圧  $V_R$  および  $V_L$  に対応する。

【0020】上記(1)式および(2)式に示した出力電圧  $V_R$  および  $V_L$  は、それぞれビームの設計軌道 110C からの水平方向変位  $x$  と線形な関係にあるが、ビーム位置モニタ内のビーム強度  $e$  N に比例した量である。このため、信号処理回路においては、ビーム強度に依存しない水平方向位置  $x$  として、ビームの設計軌道からの変位  $x$  を次の(3)式にしたがって算出するようになっている。

【0021】

【数3】

$$x = \frac{W V_R - V_L}{2 V_R + V_L} \quad \dots \dots (3)$$

三角電極型ビーム位置モニタを設置するに際しては、シンクロトロンにおける電磁石配置(ラティス)によっては、水平方向のベータトロン振動の振幅と、垂直方向のベータトロン振動の振幅がほぼ同一地点で最大になるところに設置することが望ましく、シンクロトロンにおいては、シンクロトロン直線部に、水平方向ビーム位置測定用のビーム位置モニタと垂直方向ビーム位置測定用のビーム位置モニタを並べて設置する構成が採用されている。

【0022】なお、この種のビーム位置モニタに関連するものとしては、特開平6-251900号公報、特開平4-357698号公報、特開平6-96898号公報、特開平3-225800号公報が挙げられる。

【0023】

【発明が解決しようとする課題】従来技術においては、ビーム位置モニタを利用して、シンクロトロンを周回するビームの位置を測定するに際しては、ビームの水平方向とビームの垂直方向の位置をそれぞれ異なるビーム位置モニタで測定しなければならず、水平方向ビーム位置測定用ビーム位置モニタと、垂直方向ビーム位置測定用ビーム位置モニタをシンクロトロンの直線部に並べて設置することが余儀なくされ、シンクロトロンを小型化することが困難である。

【0024】本発明の課題は、同じ信号引出電極を用いてビームの水平方向位置と垂直方向位置を測定することができるビーム位置モニタおよびこれを用いたシンクロトロンを提供することにある。

【0025】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するためには、本発明は、ビームの伝送路を構成する真空容器と、基準電位が与えられて前記真空容器内に配置された基準電極と、前記真空容器内におけるビームの設計軌道を基準に上下に一対ずつ分かれて配置されビームの通過に伴う電荷を誘起させる4個の信号引出電極と、前記基準電極を基準電位として前記各信号引出電極に誘起された電位の信号をそれぞれ出力する4個の信号引出端子とを備え、前記信号引出電極のうち上側に配置された2個の信

号引出電極はそれぞれ上側の水平面を形成し、下側に配置された2個の信号引出電極はそれぞれ下側の水平面を形成してなるビーム位置モニタを構成したものである。

【0026】前記ビーム位置モニタを構成するに際しては、以下の要素を付加することができる。

【0027】(1)前記信号引出電極のうち上側に配置された2個の信号引出電極および下側に配置された2個の信号引出電極は、それぞれ前記ビームの進行方向に対して斜めに交差する直線状の間隙を間にして相対向して配置されてなる。

【0028】(2)前記4個の信号引出電極はそれぞれ前記水平面に対して垂直な垂直面を形成し、かつ前記各水平面と前記各垂直面によって矩形形状の枠体を形成してなるとともに、上側に配置された一方の信号引出電極の垂直面および下側に配置された一方の信号引出電極の垂直面は、それぞれ鉛直軸に対して斜めに交差する直線状の間隙を間にして上下に分かれて配置され、上側に配置された他方の信号引出電極の垂直面および下側に配置された他方の信号引出電極の垂直面は、それぞれ鉛直軸に対して斜めに交差する直線状の間隙を間にして上下に分かれて配置されてなる。

【0029】(3)前記信号引出電極のうち上側に配置された2個の信号引出電極および下側に配置された2個の信号引出電極は、それぞれ前記ビームの進行方向に沿った直線状の間隙を間にして相対向して配置されてなる。

【0030】(4)前記4個の信号引出電極はそれぞれ前記水平面に対して垂直な垂直面を形成し、かつ前記各水平面と前記各垂直面によって矩形形状の枠体を形成してなるとともに、上側に配置された一方の信号引出電極の垂直面および下側に配置された一方の信号引出電極の垂直面は、それぞれ鉛直軸に対して直交する直線状の間隙を間にして上下に分かれて配置され、上側に配置された他方の信号引出電極の垂直面および下側に配置された他方の信号引出電極の垂直面は、それぞれ鉛直軸に対して直交する直線状の間隙を間にして上下に分かれて配置されてなる。

【0031】(5)前記4個の信号引出端子から出力される信号を演算処理してビームの設計軌道からの変位を示す水平方向位置および垂直方向位置を算出する信号処理回路を備えてなる。

【0032】(6)前記信号処理回路は、上側に配置された一方の信号引出電極から出力された第1の信号と前記一方の信号引出電極に相対向して下側に配置された一方の信号引出電極から出力された第2の信号との和を演算する第1の演算回路と、上側に配置された他方の信号引出電極から出力された第3の信号と前記他方の信号引出電極に相対向して下側に配置された他方の信号引出電極から出力された第4の信号との和を演算する第2の演算回路と、前記第1の演算回路の演算値と前記第2の演

算回路の演算値との差と和の比を基に前記ビームの設計軌道からの水平方向変位となるビームの水平方向位置を算出する水平方向位置算出回路と、前記第1の信号と前記第3の信号との和を演算する第3の演算回路と、前記第2の信号と前記第4の信号との和を演算する第4の演算回路と、前記第3の演算回路の演算値と前記第4の演算回路の演算値との差と和の比を基に前記ビームの設計軌道からの垂直方向変位となるビームの垂直方向位置を算出する垂直方向位置算出回路とから構成されてなる。

【0033】前記した手段によれば、4個の信号引出電極がビームの設計軌道を基準にして上下に2個ずつ分かれて配置され、上側の2個の信号引出電極間と下側の2個の信号引出電極間にはそれぞれ間隙が形成されているため、ビームの通過に伴って各信号引出電極に誘起された電荷は、ビームとの位置、接地電極の電位、信号引出電極の大きさや信号引出電極と接地電極との距離に応じた電位となり、各信号引出電極に誘起された電位を信号処理回路で演算することで、ビームの設計軌道からの水平方向変位となるビームの水平方向位置およびビームの設計軌道からの垂直方向変位となるビームの垂直方向位置を求めることができる。

【0034】具体的には、上下2個の信号引出電極に誘起された電位の和は、上側の信号引出電極間および下側の信号引出電極間を分離する間隙によって分けられたビームの長さと線形な関係になっており、各電極の電位和同士の差と和の比を取ることで、ビームの水平方向位置を求めることができる。

【0035】一方、上側の2個の信号引出電極に誘起された電位の和と、下側の2個の信号引出電極に誘起された電位の和は、それぞれビームから上下の電極までの距離と線形な関係になっている。このため上側の2個の引出電極から出力される信号の和と、下側の2個の引出電極から出力される信号の和を演算し、この演算値の差と和の比を求ることでビームの垂直方向位置を算出することができる。

【0036】従って、同一の信号引出電極でビームの水平方向位置とビームの垂直方向位置を測定することができ、ひいては1台のビーム位置モニタによってビームの水平方向位置と垂直方向位置を測定することができる。このビーム位置モニタをシンクロトロンの直線部に設置することで、シンクロトロンの小型化に寄与することができる。

【0037】また、本発明は、荷電粒子によるビームを前段加速器から入射する入射装置と、所定のエネルギーまで加速されたビームを出射する出射装置と、前記入射装置と前記出射装置とを結ぶ環状のビーム伝送路中のビームに磁場を与えて前記ビームをビームの設計軌道に沿って偏向させる偏向電磁石と、前記ビーム伝送路中のビームに対して高周波加速電圧を印加して前記ビームを加速する高周波加速空洞と、前記ビーム伝送路中のビーム

を水平方向に収束させる収束型四極電磁石と、前記ビーム伝送路中のビームを垂直方向に収束させる発散型四極電磁石とを有するシンクロトロンにおいて、前記ビーム伝送路中のビームの位置を監視するビーム位置モニタとして、前記いずれかのビーム位置モニタを備えてなるシンクロトロンを構成したものである。

【0038】前記シンクロトロンを構成するに際しては、信号処理回路を備えたビーム位置モニタの他に、以下の要素を付加することができる。

【0039】(1) 前記信号処理回路により算出されたビーム位置とビームの設計軌道との差から前記ビーム伝送路中のビームの軌道を補正するための励磁量を算出する励磁量算出手段と、前記励磁量算出手段の算出による励磁量に従った電磁力を前記ビーム伝送路中のビームに作用させて前記ビームの軌道を補正するステアリング電磁石とを備えてなる。

【0040】(2) 前記偏向電磁石の磁場強度を検出する磁場強度検出手段と、前記磁場強度検出手段の検出による磁場強度に従って高周波加速電圧に関する周波数設定値を算出する周波数設定値算出手段と、前記信号処理回路により算出されたビーム位置とビームの設計軌道との差から高周波加速電圧に関する周波数補正量を算出する周波数補正量算出手段と、前記高周波加速空洞に高周波加速電圧を供給する発振器と、前記周波数設定値算出手段の算出による周波数設定値と前記周波数補正量算出手段の算出による周波数補正量とを加算して得られた演算値に従って前記発振器の出力による高周波加速電圧の周波数を補正する周波数補正手段と、前記信号処理回路の処理により得られてパンチ形状信号を基に前記ビーム伝送路中のビームによる位相幅振動を減衰させるための高周波加速電圧に関する電圧補正量を算出する電圧補正量算出手段と、前記高周波加速空洞から発生する高周波加速電圧を検出する高周波加速電圧検出手段と、前記電圧補正量算出手段により算出された電圧補正量と前記高周波加速電圧検出手段により検出された高周波加速電圧とを加算して得られた演算値に従って前記発振器の出力による高周波加速電圧の振幅を補正する振幅補正手段とを備えてなる。

【0041】

【発明の実施の形態】(実施形態1) 以下、本発明の一実施形態を図面に基づいて説明する。図1は本発明の第1実施形態を示すビーム位置モニタにおける信号引出電極の配置を説明するための斜視図、図2はビーム位置モニタの縦断面図である。図1および図2において、ビーム位置モニタは、4個の信号引出電極10UL、10UR、10DL、10DRを備えており、各信号引出電極10UL、10UR、10DL、10DRは三角形状に形成され、荷電粒子によるビーム12の設計軌道1sを基準に上下に一対ずつ(2個ずつ)分かれて配置されている。上側に配置された信号引出電極10UL、10UR

Rはそれぞれ同一平面上に上側の水平面を形成しており、これら信号引出電極間には、ビーム12の進行方向に対して斜めに交差する直線状の間隙（切り込み）14が形成されている。すなわち、信号引出電極10URと信号引出電極10URは間隙14を間に、その斜辺が相対向するように配置されている。一方、下側に配置された2個の信号引出電極10DL、10DRはそれぞれ同一平面上に下側の水平面を形成しており、これら信号引出電極間には、ビーム12の進行方向に対して斜めに交差する直線状の間隙（切り込み）16が形成されている。すなわち、信号引出電極10DL、10DRは間隙16を間に、三角形の斜辺が相対向して配置されている。

【0042】4個の信号引出電極10UR～10DRの周囲には矩形形状（断面形状が長方形形状）の接地電極18が配置されており、この接地電極18は、ビーム12の伝送路を構成する真空容器20に固定され、基準電位として接地電位が与えられている。真空容器20の壁面には4個の信号引出端子22UL、22UR、22DL、22DRが2個ずつ上下に分かれて配置されている。そして各信号引出端子22UR～22DRは接地電極18に接続されているとともに、信号引出端子22ULは信号引出電極10ULに、信号引出端子22URは信号引出電極10URに、信号引出端子22DLは信号引出電極10DLに、信号引出端子22DRは信号引出電極10DRにそれぞれ接続されている。そして各信号引出端子22UL～22DRからは、ビーム12の通過に伴って各信号引出電極10UL～10DRに電荷が誘起されたときに、各信号引出電極10UL～10DRに誘起された電位の信号 $V_{UL}$ 、 $V_{UR}$ 、 $V_{DL}$ 、 $V_{DR}$ がそれぞれ接地電極18を基準電位とした信号として信号処理回路に出力されるようになっている。

【0043】次に、上記構成によるビーム位置モニタの測定原理について説明する。まず、本発明に係るビーム位置モニタを利用して、水平方向のビーム位置を測定する際の測定原理について説明する。

【0044】水平方向のビーム位置を測定するに際して、従来技術では2個の信号引出電極を用いてビーム位置を測定しているのに対して、本発明に係るビーム位置モニタでは4個の信号引出電極によってビーム位置を測定する。

$$x = \frac{W}{2} \frac{(V_{UR} + V_{DR}) - (V_{UL} + V_{DL})}{(V_{UR} + V_{DR}) + (V_{UL} + V_{DL})} \quad \dots (6)$$

次に、本発明に係るビーム位置モニタを利用して、垂直方向のビーム位置を測定する際の測定原理について説明する。従来技術では、鉛直方向に沿って配置された2個の信号引出電極によって垂直方向のビーム位置を測定しているのに対して、本発明では、水平方向のビーム位置を測定するのに用いた4個の信号引出電極によっても垂直方向のビーム位置を測定するために、4個の信号引出

\*定しているが、本発明に係るビーム位置モニタによって水平方向のビーム位置を測定する際の測定原理は、従来技術にある三角電極型ビーム位置モニタによるビーム位置測定の際の測定原理と同じである。

【0045】具体的には、Lをビーム進行方向における各信号引出電極の長さ、Wを水平方向における信号引出電極の長さ、xをビーム12の設計軌道1Sからの水平方向変位、L1を、信号引出電極10UL、10URによって通過ビームを分けたときに、信号引出電極10UL、10UR上に投影したときの長さ、L2を、信号引出電極10DL、10DRによって通過ビームを分けたときに、信号引出電極10DL、10DR上に投影したときのビームの長さとし、各信号引出電極10UL、10UR、10DL、10DRからの出力電圧をそれぞれ $V_{UL}$ 、 $V_{UR}$ 、 $V_{DL}$ 、 $V_{DR}$ とすると、次の(4)式、(5)式によって、ビームの水平方向位置を算出することができる。

【0046】

【数4】

$$V_{UL} + V_{DR} - \frac{q_1}{C} - \frac{eN}{C} \frac{L_1}{L} = \frac{eN}{C} \left( \frac{x}{W} + \frac{1}{2} \right) \quad \dots (4)$$

【0047】

【数5】

$$V_{UL} + V_{DR} - \frac{q_2}{C} - \frac{eN}{C} \frac{L_2}{L} = \frac{eN}{C} \left( -\frac{x}{W} + \frac{1}{2} \right) \quad \dots (5)$$

ここで、 $q_1$ は信号引出電極10URと10DR上に誘起された電荷の和であり、 $q_2$ は信号引出電極10UL、10DL上に誘起された電荷の和である。またCは対地静電容量、eは素電荷、Nはビーム位置モニタ内にあるビーム粒子の数である。

【0048】(4)式および(5)式における $V_{UR} + V_{DR}$ および $V_{UL} + V_{DL}$ はビームの設計軌道1Sからの変位xと線形な関係にある量であるが、ビーム強度に比例した量である。そこで、 $V_{UR} + V_{DR}$ および $V_{UL} + V_{DL}$ の差と和の比を取ることで、次の(6)式に示すように、ビーム強度に依存しない水平方向位置xを得ることができる。

【0049】

【数6】

電極に誘起された電位を演算処理することで垂直方向のビーム位置を求めるとしている。

【0050】具体的には、上側に配置された2個の信号引出電極10UL、10URからの出力電圧の和 $V_{UR} + V_{UL}$ および下側に配置された2個の信号引出電極10DL、10DRからの出力電圧の和 $V_{DR} + V_{DL}$ は、それぞれビームから各信号引出電極までの垂直

方向の距離に依存した量である。そこで、上側に配置された2個の信号引出電極10UL, 10URから出力される出力電圧の和 $V_{UR} + V_{UL}$ および下側に配置された2個の信号引出電極10DL, 10DRから出力される出力電圧の和 $V_{DR} + V_{DL}$ を次の(7)式によって演算することで、ビームの垂直方向位置yを算出する。

【0051】

【数7】

$$y = \frac{H}{2} \frac{(V_{UR} + V_{UL}) - (V_{DR} + V_{DL})}{(V_{UR} + V_{UL}) + (V_{DR} + V_{DL})} \quad \dots \dots (7)$$

ここで、Hは上下の信号引出電極間の距離である。

【0052】上記測定原理にしたがってビーム位置を測定する場合、ビーム水平方向位置の測定精度に関しては、従来技術と同様に、4個の信号引出電極は三角形状に形成され、上側の信号引出電極間と下側の信号引出電極間は斜め方向の間隙（切れ込み）14, 16によって分断されているため、三角電極型ビーム位置モニタと同等の位置測定精度を得ることができる。

【0053】しかし、ビーム垂直方向位置の測定精度に関しては、ビームが設計軌道1Sから垂直方向に変位した位置での位置測定精度は大きく悪化することが予想される。

【0054】そこで、本実施形態では、ビーム位置モニタの信号引出電極の構成や信号引出電極の大きさを静電圧計算の結果に基づいて適切に調整することで、所望の位置測定精度を得ることとしている。

【0055】以下、本発明に係るビーム位置モニタによってビームの垂直方向位置測定を行う際の位置測定精度を高めるために用いる静電圧計算の計算体系とその計算結果について説明する。

【0056】本発明に係るビーム位置モニタでは、各信号引出電極10UL, 10UR, 10DL, 10DRから得られる各出力電圧の合成 $V_{UR} + V_{UL}$ と $V_{DR} + V_{DL}$ を信号処理回路によって演算し、上記(7)式によってビームの垂直方向位置を算出する。しかし、このままでは、ビームが設計軌道から垂直方向に変位した位置での位置測定精度が悪化することが予想される。そこで、静電圧計算の計算体系においては、ビームを模擬した円筒状の空間電荷の上下を覆うように配置した2個の信号引出電極に誘起した電位をそれぞれ $V_u$ および $V_d$ とし、次の(8)式によって、ビームの垂直方向位置yを算出する。

【0057】

【数8】

$$y = \frac{H}{2} \frac{V_u - V_d}{V_u + V_d} \quad \dots \dots (8)$$

ここで、Hは上下に配置した電極の間隔である。

【0058】静電圧計算の計算体系においては、計算上のモデルとして、水平面を形成する2個の信号引出電極に誘起された電位に基づいてビームの垂直方向位置yを

算出しているが、このモデルによってもビームの垂直方向位置を精度良く測定できる結果を図3に示す。

【0059】図3は、ビーム位置モニタ内に配置した空間電荷を垂直方向に移動させたときの設計軌道からの変位を横軸に取り、(8)式によって得られる垂直方向の電荷位置を縦軸に取ったときの計算結果である。図3における各プロットは、上下の信号引出電極の距離Hを6.8cmから16.8cmまで広げたときの結果である。

【0060】図3において、ビーム位置の測定精度に関する要件はシンクロトロンを周回するビームの種類、ビームサイズ、ビーム強度によって異なるが、このモデルでは、直徑5mmの陽子ビームが10<sup>7</sup>個シンクロトロン内を周回しているものとし、垂直方向位置の測定精度としては、ビームの設計軌道を中心 $\pm 1\text{cm}$ の範囲で、1mm以下の位置測定精度が得られることを要件とした。また、各信号引出電極の水平方向における長さWは20cmとした。図3に示す計算結果によれば、Hを16.8cmまで広げても、リニアリティが良く、所望の位置測定精度が得られることが分かる。

【0061】ここで、ビームが水平方向に変位した際の垂直方向位置測定精度に対する影響を静電圧計算によって見積もった計算結果を図4に示す。この計算では上下の電極間の距離Hは6.8cmとした。この計算結果から、水平方向にビームが変位しても、ビームの変位と、(8)式によって得られた計算結果との間の線形関係は保たれているが、各プロットを一次式で近似した際の傾きは、水平方向変位が大きくなると変化する。理想的には、水平方向へのビームの変位に追従して、(8)式によって得られた値を補正することが望ましい。しかし、ビームの水平方向位置と垂直方向位置を同じに利用する制御系では、このような方法を利用することは困難である。また上下の電極間の距離Hを6.8cmから16.8cmまで広げると、傾きは大きく変化し、ビームの設計軌道を中心 $\pm 1\text{cm}$ の範囲で、1mm以下の位置測定精度を得るという、前記要件を達成することが困難になる。そこで、本実施形態では、上下の信号引出電極間の距離Hを6.8cmとした。

【0062】また、ビームと真空容器24側面との距離が近くなると、ビーム中の電荷から出る電気力線は真空容器24の壁面に多く吸込まれ、これによってビーム位置の測定精度は悪化する。このため、理想的には、電荷から出る電気力線が全て信号引出電極10UL~10DRに吸込まれることが望ましい。そこで、垂直方向のビーム位置測定精度を確保するためには、前述したように、上下の信号引出電極間の距離Hを適度に短くすること以外に、各信号引出電極の水平方向の長さを、ビームの水平方向の変位、またはビームの水平方向への広がりに対して、十分長くすることも考えられる。これによって、ビームから各信号引出電極10UL~10DRまで

の距離は、ビームの側面にある真空容器24の壁面までの距離より十分短くなり、ビーム中の電荷から出た電気力線の多くは、上下に分かれて配置された4個の信号引出電極10UL～10DRに引き込まれ、垂直方向ビーム位置の測定精度として十分なものが得られる。

【0063】このように、本実施形態におけるビーム位置モニタによれば、水平面を構成する4個の信号引出電極10UL～10DRを用いて、すなわち同一の信号引出電極を用いてビームの水平方向位置と垂直方向位置を測定することが可能になる。

【0064】この場合1台のビーム位置モニタによってビームの水平方向位置と垂直方向位置を測定できるため、このビーム位置モニタをシンクロトロンに設置することで、シンクロトロンの小型化が可能になる。

【0065】本発明に係るビーム位置モニタをシンクロトロンに設置するに際しては、水平方向および垂直方向のベータトロン振動の振幅が共に大きくなる位置が好ましい。

【0066】例えば、図5に示すように、収束型四極電磁石44の付近あるいは発散型四極電磁石48の付近が好ましい。図5はシンクロトロンの円周方向を横軸に、シンクロトロンの円周方向に沿って、水平方向のベータトロン関数50Xと垂直方向のベータトロン関数50Yを求めたときの計算結果を示す図である。図5から、ビームの通る軌道の設計軌道からの歪み(COD)を十分な精度で測定するためには、ベータトロン振動の波長ごとに、2個から3個のビーム位置モニタ46を設置することが望ましい。

【0067】(実施形態2) 次に、本発明の第2実施形態を図6にしたがって説明する。本実施形態は、水平面を形成する4個の信号引出電極10UL～10DRのうち2個の信号引出電極10UL、10DLの左側面側に三角形形状の垂直面を形成し、各垂直面を、鉛直軸に対して斜めに交差する直線状の間隙(切り込み)26を間にして上下に分けて配置し、2個の信号引出電極10UR、10DRの右側面側に三角形形状の垂直面を形成し、各垂直面を、鉛直軸に対して斜めに交差する直線状の間隙(切り込み)28を間にして上下に分けて配置したものであり、他の構成は実施形態1のものと同様であり、各信号引出電極10UL～10DRに誘起された電荷は信号引出端子22UL～22DRを介して、出力電圧V<sub>UL</sub>、V<sub>UR</sub>、V<sub>DL</sub>、V<sub>DR</sub>として出力される。そして各出力電圧を基に信号処理回路によってビームの水平方向位置を算出するに際しては(6)式が用いられ、ビームの垂直方向位置を算出するに際しては(7)式が用いられる。

【0068】ここで、本実施形態では、4個の信号引出電極10UL～10DRにそれぞれ水平面と垂直面を形成し、全体として矩形形状の枠体を形成し、各信号引出電極間にそれぞれ斜め方向に形成された直線状の間隙1

4、16、26、28を形成しているため、水平方向のビーム位置xは(4)式および(5)式によって表され、垂直方向のビーム位置yは、以下の(9)式および(10)式で表されることから、信号処理回路によって算出されるビーム位置と、実際のビーム位置との間には線形な関係が成立し、優れたビーム位置測定精度が得られる。

【0069】

【数9】

$$V_{UL} + V_{UR} = \frac{eN}{C} \left( \frac{y}{H} + \frac{1}{2} \right) \quad \dots \dots (9)$$

【0070】

【数10】

$$V_{DL} + V_{DR} = \frac{eN}{C} \left( -\frac{y}{H} + \frac{1}{2} \right) \quad \dots \dots (10)$$

本実施形態によれば、4個の信号引出電極10UL～10DRを用いて、すなわち1台のビーム位置モニタを用いてビームの水平方向位置および垂直方向位置を測定することができ、このビーム位置モニタをシンクロトロンに設置したときにはシンクロトロンの小型化が可能になる。

【0071】また、本実施形態によれば、ビーム12の周囲が4個の信号引出電極10UL～10DR 10UL～10DRによって囲まれているため、電荷の漏れが抑制され、ビーム位置の測定精度をより高めることができになる。

【0072】(実施形態3) 次に、本発明の第3実施形態を図7にしたがって説明する。本実施形態は、水平面を形成する4個の信号引出電極10UL～10DRのうち2個の信号引出電極10UL、10DLの左側面側に長方形形状の垂直面を形成し、これら垂直面を、ビーム12の進行方向1sに沿った(ビーム進行方向と平行)直線状の間隙30を間にして上下に分けて配置し、2個の信号引出電極10UR、10DRの右側面側に長方形形状の垂直面を形成し、これら垂直面を、ビームの進行方向に沿った(ビームの進行方向と平行)直線状の間隙(切れ込み)32を間にして上下に分けて配置し、全体として矩形形状の枠体を形成したものであり、他の構成は第1実施形態のものと同様である。

【0073】各信号引出電極10UL～10DRはそれぞれ4個の信号引出端子に接続され、各信号引出電極10UL～10DRからは電圧V<sub>UL</sub>、V<sub>UR</sub>、V<sub>DL</sub>、V<sub>DR</sub>が outputされる。そして、各信号引出電極10UL～10DRから出力された電圧V<sub>UL</sub>、V<sub>UR</sub>、V<sub>DL</sub>、V<sub>DR</sub>をビーム位置モニタの信号処理回路で処理することで、ビームの水平方向位置は(6)式によって求められ、ビームの垂直方向位置は(7)式によって求められる。

【0074】本実施形態におけるビーム位置モニタでは、水平方向のビーム位置測定の際は、各信号引出電極

10 ULR~10 DR間の間隙14、16を利用しているため、各出力電圧とビーム水平方向位置との間には、(4)式および(5)式の関係が成立し、三角電極型ビーム位置モニタと同等の水平方向位置測定精度が得られる。

【0075】また、本実施形態においては、ビームの垂直方向位置の測定の際には、ビームの左右を覆うように垂直面が形成されているため、モニタ内のビーム電荷からでた電気力線の多くは各信号引出電極に吸込まれる。これによって、優れた垂直方向ビーム位置測定精度が得られる。

【0076】ビーム位置モニタの信号引出電極10 ULR~10 DRとしては、水平面の形状を長方形形状に形成し、上側の信号引出電極間および下側の信号引出電極間にビームの進行方向に沿った直線状の間隙を形成する構成を採用することも可能である。

【0077】(実施形態5) 次に、本発明に係るビーム位置モニタの信号処理回路の実施形態を図8にしたがって説明する。

【0078】本実施形態における信号処理回路においては、以下のことを考慮してヘテロダイン検波方式が採用されている。すなわち、前段加速器である高周波線形加速器からシンクロトロンに入射された、エネルギー約10 MeVの陽子ビームを約250 MeVまで順次加速すると、ビームの周回周波数は、シンクロトロンを周回することに約1MHz~6MHzに渡る。そこで、このビームの周回周波数帯域におけるビーム位置のアナログ演算精度を向上させるために、信号処理回路ではヘテロダイン検波方式が採用されている。ヘテロダイン検波方式によって周波数変換が行われると、ビーム位置モニタからの信号を周波数 $f_1$ の正弦波とし、これを周波数 $f_0 + f_1$ の正弦波である高周波信号とミキシングすることによって、 $\sin(f_1) \times \sin(f_0 + f_1) = (1/2) \times [\cos(f_0) - \cos(2f_0 + f_1)]$ が得られる。この演算によって得られた信号を帯域通過フィルタを通過させることで、不要な周波数 $2f_0 + f_1$ 成分を取り除くことができ、一定周波数 $f_1$ に変換された信号を処理することができる。

【0079】信号処理回路は、信号入力端子161~164、分配・合成部165、加算器166~168、増幅器169、170、乗算器171~174、帯域通過フィルタ175~178、乗算器179~182、低域通過フィルタ183~186、加算器187、減算器188、加算器189、減算器190、位置検出器191、192、包絡線検波器193、乗算器210、211、位置信号増幅器212、213、増幅器214を備えて構成されている。

【0080】信号入力端子161~164には、それぞれ各信号引出電極10 ULR、10 DR、10 ULR、10 DRからの出力電圧 $V_{UR}$ 、 $V_{DR}$ 、 $V_{UL}$ 、 $V_{DL}$ が

入力されており、各出力電圧は分配・合成部165において、分配・合成され、分配・合成部165からは、 $V_{UR} + V_{DR}$ の合成によるR信号、 $V_{UL} + V_{DL}$ の合成によるL信号、 $V_{UL} + V_{UR}$ の合成によるU信号、 $V_{DR} + V_{DL}$ の合成によるD信号が出力されるようになっている。各R、L、U、D信号は加算器166、167、168によって加算され、パンチ形状信号として出力されるようになっている。さらに各出力信号の和(R+L+U+D)の信号は包絡線検波器193によって包絡線検波された後、増幅器214によって増幅され、ビーム強度のピーク値を示す信号として出力されるようになっている。この場合、包絡線検波に用いるダイオードには順方向のバイアスを印加し、入力信号の振幅に対する出力信号の線形性を良くすることができる。またダイオードの出力側には、低域通過フィルタを設け、1~6MHzの入力信号に対して滑らかな包絡線検波が可能なように、遮断周波数を60kHzとしている。これは、パンチ形状の進行方向への振動の最大周波数10kHzを検出するためにも十分な値である。

【0081】また、各R、L、U、D信号と、検波用高周波入力端子から入力された高周波信号(72~77MHz)を増幅器169で増幅して得られた信号とを乗算器171~174でミキシング(乗算)し、ミキシングされた信号をそれぞれ中心周波数71MHzの帯域通過フィルタ175~178を通すことで、基本周波数成分が一定周波数の71MHzの信号に変換することができる。これによって不要な周波数成分を除去することができる。さらに、各信号に対して、局部発振器入力端子から入力された70.545MHzの信号を増幅器170で増幅した信号と乗算器179~182でミキシング(乗算)し、低域通過フィルタ175~178を通過した71MHzの信号を455kHzの信号に変換し、さらにこれらの信号を低域通過フィルタ183~186を通すことで、不要な上側波帯を除去することができる。この後一定周波数(455kHz)に変換された各R、L、U、Dの信号は加算器187、189、減算器188、190に入力され、これら加算器の加算処理によって(R+L)、(U+D)の信号が得られるとともに、各減算器の減算処理によって、(R-L)、(U-D)の信号が得られる。すなわちこれらの加算、減算処理により、 $[(V_{UR} + V_{DR}) + (V_{UL} + V_{DL})]$ 、 $[(V_{UR} + V_{DR}) - (V_{UL} + V_{DL})]$ 、 $[(V_{UL} + V_{UR}) + (V_{DR} + V_{DL})]$ 、 $[(V_{UL} + V_{UR}) - (V_{DR} + V_{DL})]$ が得られる。

【0082】加算、減算処理によって得られた信号はそれぞれ位置検出器191、192に入力される。各位置検出器191、192では、振幅位相変換方式によって、減算信号と加算信号の振幅比を高周波信号の位相差に変換し、この位相差を位相検出器で検出することによって各信号の除算(R-L)/(R+L)および(U-

D) / (U + D) が行われる。そして各演算処理により、(6)式による水平方向位置に比例した電圧 [(V<sub>UR</sub> + V<sub>DR</sub>) - (V<sub>UL</sub> + V<sub>DL</sub>)] / [(V<sub>UR</sub> + V<sub>DR</sub>) + (V<sub>UL</sub> + V<sub>DL</sub>)] および、(7)式による垂直方向位置に比例した電圧 [(V<sub>UL</sub> + V<sub>UR</sub>) - (V<sub>DR</sub> + V<sub>DL</sub>)] / [(V<sub>DL</sub> + V<sub>UR</sub>) + (V<sub>DR</sub> + V<sub>DL</sub>)] が算出される。

【0083】このときの水平方向のビーム位置を検出する位置検出器191では、加算信号(R+L)および減算信号(R-L)をπ/2分配器194、195に入力し、加算器198では(R+L) sin(ωt + φ + π/2)と(R-R) sin(ωt + φ)で加算演算を行い、他方の加算器199では、(R+L) sin(ωt + φ)と(R-L) sin(ωt + φ + π/2)で加算演算を行う。そして各加算器198、199で合成した信号は振幅制限増幅器202、203で一定振幅の信号に波形整形された後、乗算器206でミキシングされ、このミキシングにより、cos(ωt + φ - α) × sin(ωt + φ + α) = 1/2 sin(2α) + 1/2 sin(2ωt + 2φ) が得られる。

【0084】ここで、ωはビームの周回周波数。φはビームの位相、αはtan α = (R-L) / (R+L) で与えられる。そしてミキシングによって得られた信号は低域通過フィルタ208で低周波成分のみが抽出され、位置検出器191の出力信号として、(1/2) × sin(2α) の信号が得られる。この場合、αはtan α = (R-L) / (R+L) で与えられるので、低域通過フィルタ208を通過した信号は、乗算器210によって、水平方向ビーム位置信号の変位1cm当たり、信号出力が1Vになるように乗算される。この信号が増幅器212で増幅されると、水平位置出力端子からは、ビームの水平方向位置を示す出力電圧が得られることになる。

【0085】ビームの垂直方向位置に関しては、同様に、位置検出器192において振幅位相変換方式による演算が行われ、この演算値が乗算器211に入力されると、乗算器211において、垂直方向ビーム位置信号の変位1cm当たり、出力信号が1Vになるような乗算が行われる。これによって、垂直位置出力端子からは、ビームの垂直方向位置を示す電圧が出力される。

【0086】このように、本実施形態によれば、4個の信号引出電極10UR、10DR、10UL、10DLから得られた信号を信号処理回路によって演算処理することで、1台のビーム位置モニタによってもビームの水平方向位置および垂直方向位置を算出することができる。これによって、ビーム位置モニタに示す信号処理回路を設置する場合でも設置および製作のコストの低減を図ることができる。

【0087】また、本実施形態によれば、ビームの周回周波数が、例えば、1MHzから6MHzのように大き

く変化するようなシンクロトロンでは、ヘテロダイン検波方式を用いることで、ビーム位置のアナログ演算を広い周波数帯域に渡って精度良く行うことができる。

【0088】(実施形態5) 次に本発明の第5実施形態を図9にしたがって説明する。本実施形態は、ビーム位置モニタを利用してビームの軌道補正(COD補正)を行うようにしたものである。すなわち、シンクロトロンでは、偏向電磁石や四極電磁石の磁場強度や据付けに誤差が生じると、ビームの軌道が設計軌道から歪む(COD)ことがある。そこで、ビーム位置モニタから得たビーム位置情報を基に軌道補正用電磁石(ステアリング電磁石)によって新たなCODを作り出し、誤差磁場などでできたCODを打ち消すことでビームの軌道補正を行うこととしている。

【0089】具体的には、シンクロトロンにn個のビーム位置モニタ46M1～46Mnが配置されているときに、m個の水平方向軌道補正用電磁石(ステアリング電磁石)60CH1～60CHmを配置するとともにm個の垂直方向軌道補正用電磁石(ステアリング電磁石)62CV1～CVmを配置し、各ビーム位置モニタ46M1～46Mnを信号処理回路56D1～56Dnを介してフィードバック制御装置54に接続し、フィードバック制御装置54をビーム軌道表示装置52に接続するとともに電磁石電源58H、58Vに接続し、各電磁石電源58H、58Vをそれぞれ電磁石60CH1～60CHm、62CV1～62CVmに接続し、COD補正装置を構成する。この場合、補正用電磁石の数mとビーム位置モニタの数nはシンクロトロンの規模と、ビーム軌道の補正精度にも依存するが、本実施形態では、m=16、n=16としている。

【0090】各ビーム位置モニタ46M1～46Mnから出力された出力電圧V<sub>UR</sub>、V<sub>DR</sub>、V<sub>UL</sub>、V<sub>DL</sub>はそれぞれ信号処理回路56D1～56Dnに入力され、各信号処理回路56D1～56Dnにおいて、各ビーム位置モニタ46M1～46Mnの検出による水平方向ビーム位置と垂直方向ビーム位置が算出され、各算出結果がフィードバック制御装置54に出力される。そしてこの算出結果は、フィードバック制御装置54において、要素16個の水平方向位置ベクトルxと、要素16個の垂直方向位置ベクトルyとして保存される。

【0091】ここで、k番目の軌道補正用電磁石CHkによる偏向角をθ<sub>k</sub>とすると、i番目のビーム位置モニタ46Miの位置での水平方向ビーム位置X<sub>jk</sub>は次の(11)式で表される。

【0092】

【数11】

$$X_{ik} = \frac{\sqrt{\beta_i \beta_k}}{2 \sin(\pi v)} \cos[\nu(\varphi_i - \varphi_k + \pi)] \theta_k \quad \dots (11)$$

50 ここで、β<sub>i</sub>、β<sub>k</sub>はi番目のビーム位置モニタの位置

と  $k$  番目の軌道補正用電磁石の位置におけるベータトロン関数、 $\gamma$  はベータトロン振動周波数、 $\phi_i$ 、 $\phi_k$  は  $i$  番目のビーム位置モニタの位置と  $k$  番目の軌道補正用電磁石の位置における位相である。

【0093】次に、 $A$  を要素  $16 \times 16$  のマトリクスとし、その要素  $a_{ik}$  を以下の (12) 式で与えると、要素 16 個の残差ベクトル  $r$  のノルム  $|r| = |x + A\theta|$  を最小にする要素 16 個のベクトル  $\theta$  をフィードバック制御装置 54 において算出する処理が行われる。

【0094】

【数 12】

$$a_{ik} = \frac{\sqrt{\beta i \beta k}}{2 \sin(\pi v)} \cos\{\psi_i - \psi_k + \pi\} \quad \dots (12)$$

次に、補正用電磁石に供給する電流と  $\theta$  は比例関係にあることを利用し、フィードバック制御装置 54 では、励磁量算出手段として、COD 補正に最適な電流値（励磁量）を算出し、各電磁石電源 58H、58V を駆動し、各補正用電磁石 60CH1～60CHm、62CV1～62CVm に最適な電流値  $I_{x1} \sim I_{xm}$ 、 $I_{y1} \sim I_{ym}$  を供給する。これにより各補正用電磁石からビーム伝送路中のビームには電流値（励磁量）にしたがった電磁力が作用し、ビームの軌道が修正（補正）される。

【0095】なお、ビーム軌道表示装置 52 にはビーム位置情報や各補正用電磁石の励磁量などの情報が表示されるため、運転員はこれら的情報を常時確認することができる。

【0096】このように、本実施形態によれば、ビーム位置モニタによって、水平方向および垂直方向のビーム位置を検出し、検出されたビーム位置とビームの設計軌道との差からビームの軌道を補正するための励磁量がフィードバック制御装置 54 によって算出され、この励磁量にしたがった電磁力が各補正用電磁石からビームに作用するため、偏向電磁石や四極電磁石の磁場強度や据付けに誤差が生じても、ビームの軌道を設計軌道に補正することができる。

【0097】(実施形態 6) 次に、本発明の第 6 実施形態を図 10 にしたがって説明する。本実施形態は、ビーム位置モニタを利用して高周波加速電圧を制御するようにしたものである。すなわち、シンクロトロンでは、加速段階において、ビームの運動量上昇に対して、ビームを一定の設計軌道上を周回させるために、ビームの運動上昇に合わせて偏向電磁石の磁場強度を強める必要がある。またビームの周回周波数の上昇に対して安定に加速を維持するために、周回周波数の上昇に合わせて高周波加速電圧の周波数を増加させる必要がある。そこで、高周波加速制御系では、偏向電磁石の磁場強度の変化を検出し、この検出結果に同期して高周波加速電圧の周波数を制御することとしている。

【0098】高周波加速電圧を制御するための高周波加

速制御系は、図 10 に示すように、偏向電磁石 42、信号処理回路を含むビーム位置モニタ 46、高周波加速空洞 70、偏向電磁石 42 の磁極間に設置されて磁場強度を測定するサーチコイル（図示省略）、高周波加速空洞 70、空洞電圧モニタ（図示省略）、磁場クロック発生装置 64、表示装置 52、フィードバック制御装置 54、発振器 66、電力増幅器 68 から構成されている。

【0099】高周波加速制御系によって高周波加速電圧の周波数をフィードバック制御するに際しては、偏向電磁石 42 に設置されたサーチコイル（磁場強度検出手段）によってコイル端に発生した誘導起電力を測定することによって、磁場強度を測定し、磁場強度測定値を磁場クロック発生装置 64 に出力する。磁場クロック発生装置 64 では、磁場強度測定値を  $V/F$ （電圧／周波数）変換し、磁場強度の微小変化ごとに制御クロック（磁場クロック信号）を生成し、磁場クロック信号を指令としてフィードバック制御装置 54 に伝送する。フィードバック制御装置 54 では、磁場クロック信号に基づいて、高周波加速電圧の周波数設定値を算出する。すなわちフィードバック制御装置 54 は磁場強度にしたがって高周波加速電圧に関する周波数設定値を算出する周波数設定値算出手段として構成されている。

【0100】またフィードバック制御装置 54 では、ビーム位置モニタ 46 の信号処理回路によって演算された水平方向ビーム位置信号を基に、水平方向のビーム位置と水平方向の設計軌道との差を算出し、この算出値から高周波加速電圧に関する周波数補正量を算出する。すなわちフィードバック制御装置は周波数補正量算出手段としての機能も備えて構成されている。さらに、フィードバック制御装置 54 では、磁場クロック信号に基づいて設定された周波数設定値と、ビーム位置モニタ 46 からの信号に基づいて算出された周波数補正量とを加算演算し、この演算値にしたがって発振器 66 の出力による高周波加速電圧の周波数を補正する。すなわちフィードバック制御装置 54 は周波数補正手段としての機能も備えて構成されている。

【0101】フィードバック制御装置 54 により、周波数補正用の演算値にしたがって発振器 66 の周波数が補正されると、周波数の補正された低電力高周波電圧が発振器 66 から出力され、この低電力高周波電圧は電力増幅器 68 で増幅された後、高周波加速空洞 70 に印加される。これにより磁場強度の変化に同期して高周波加速電圧の周波数を制御することができる。

【0102】次に、高周波電圧の周波数が上昇するに伴ってパンチ化されたビームは、ビーム進行方向に伸縮（位相幅振動）しながらシンクロトロン内を周回する。この位相幅振動が激しくなると、ビームは安定領域から外れ、失われる可能性がある。そこで、ビーム位置モニタによって測定したパンチ形状の伸縮を基に高周波加速電圧をフィードバック制御することとしている。

【0103】具体的には、フィードバック制御装置54では、電圧補正量算出手段として、ビーム位置モニタ4の信号処理回路によって演算処理されたパンチ形状信号を基に、ビームによる位相幅振動を減衰させるために適切な高周波加速電圧の電圧補正量を算出する。またフィードバック制御装置54では、振幅補正手段として空洞電圧モニタ（高周波加速電圧検出手段）によって測定された空洞電圧値（高周波加速電圧）と、高周波加速電圧の電圧補正量とを加算演算し、この演算値にしたがって発振器66の出力による高周波加速電圧の振幅を補正する。これにより、発振器66からは、振幅の補正された低電力高周波電圧が出力され、この低電力高周波電圧は電力増幅器68で増幅された後、高周波加速空洞70に印加される。このように、パンチ形状の伸縮を基に高周波加速電圧の振幅が制御されるため、ビームによる位相幅振動を抑制しビームを安定領域に維持することができる。

【0104】本実施形態によれば、ビームの水平方向位置を三角電極型ビーム位置モニタと同等の位置測定精度で測定し、これを基に高周波加速電圧の周波数および振幅をフィードバック制御しているため、三角電極型ビーム位置モニタと同等の周波数制御精度を得ることが可能になる。

【0105】以上のように、本発明に係るビーム位置モニタによれば、1台のビーム位置モニタで水平方向と垂直方向のビーム位置を測定できるため、約半分の設置スペースでビーム位置モニタを設置することができるとともに、シンクロトロンの直線部にビーム位置モニタを設置したときには、ビーム位置モニタの占有する長さを低減でき、シンクロトロンを小型化することができる。

【0106】また、1台のビーム位置モニタを設置すれば良いため、ビーム位置モニタの設置費用を低減することができるとともに、ビーム位置モニタの製作費用の低減を図ることができる。

【0107】さらに、水平方向のビーム位置を測定する際は、三角電極型ビーム位置モニタと同等の位置測定精度が得られ、垂直方向の位置測定精度に関しては、電極の構造や大きさを適切に調整することで、三角電極型ビーム位置モニタと同等の位置測定精度が得られる。

【0108】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、同一の信号引出電極でビームの水平方向位置とビームの垂直方向位置を測定するようにしたため、1台のビーム位置モニタによってビームの水平方向位置と垂直方向位置を測定することができ、このビーム位置モニタをシンクロトロンに設置することで、シンクロトロンの小型化に寄与することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施形態を示すビーム位置モニタであって、このビーム位置モニタに用いられる信号引出電

極の配置例を示す斜視図である。

【図2】本発明の第1実施形態を示すビーム位置モニタの縦断面図である。

【図3】垂直方向の電荷位置と（8）式による垂直方向の電荷位置との関係を示す特性図である。

【図4】（a）は垂直方向の電荷位置と（8）式による垂直方向の電荷位置との関係を示す特性図、（b）は水平方向の電荷位置と一次式で近似した際の傾きとの関係を示す特性図である。

10 【図5】シンクロトロンに設置された各機器と水平方向のベータトロン関数および垂直方向のベータトロン関数との関係を示す特性図である。

【図6】本発明の第2実施形態を示すビーム位置モニタの斜視図である。

【図7】本発明の第3実施形態を示すビーム位置モニタの斜視図である。

【図8】ビーム位置モニタに用いられる信号処理回路のブロック構成図である。

20 【図9】本発明の第5実施形態を示すC O D補正装置のブロック構成図である。

【図10】本発明の第6実施形態を示す高周波加速制御系のブロック構成図である。

【図11】従来の水平方向位置測定用三角電極型ビーム位置モニタの要部平面図である。

【図12】従来の水平方向位置測定用三角電極型ビーム位置モニタの斜視図である。

【図13】従来の水平方向位置測定用三角電極型ビーム位置モニタの断面図である。

30 【図14】従来の垂直方向位置測定用三角電極型ビーム位置モニタの断面図である。

【図15】従来の三角電極型ビーム位置モニタの電気的等価回路図である。

【符号の説明】

10 U L、10 U R、10 D L、10 D R 信号引出電極

12 ビーム

14、16 間隙

18 接地電極

22 U L、22 U R、22 D L、22 D R 信号引出端子

24 真空容器

26、28、30、32 間隙

42 偏向電磁石

44 収束型四極電磁石

46 M1～46 Mn ビーム位置モニタ

48 発散型四極電磁石

52 表示装置

54 フィードバック制御装置

56 D1～56 Dn 信号処理回路

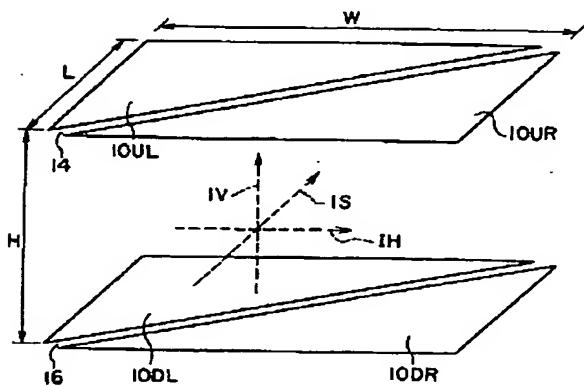
58 H、58 V 電磁石電源

60CH1~60CHm 水平方向軌道補正用電磁石  
 62CV1~62CVm 垂直方向軌道補正用電磁石  
 64 磁場クロック発生装置  
 66 発振器  
 68 電力増幅器  
 70 高周波加速空洞

\* 165 分配・合成部  
 175~178 帯域通過フィルタ  
 183~186 低域通過フィルタ  
 191, 192 位置検出器  
 193 包絡線検波器

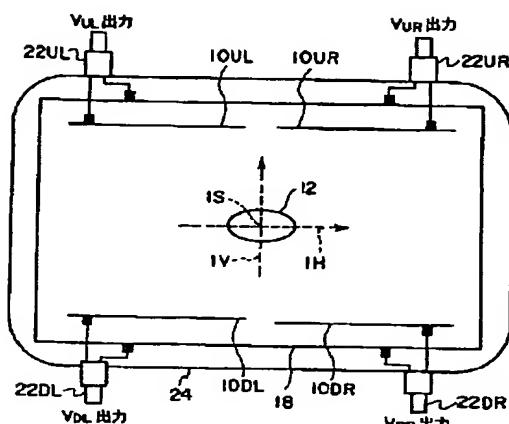
\*

【図1】



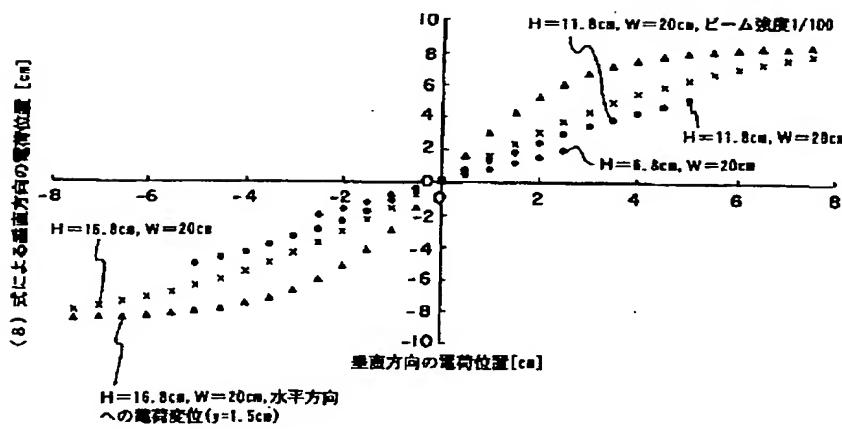
10UL, 10UR, 10DL, 10DR: 信号引出端子

【図2】

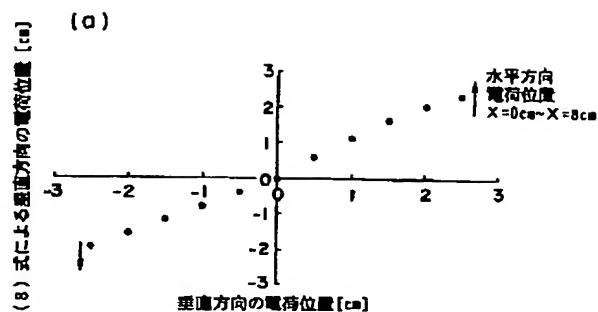


10UL, 10UR, 10DL, 10DR: 信号引出端子  
 12: ピーム 18: 磁場電磁  
 20UL, 20UR, 20DL, 20DR: 信号引出端子  
 24: 真空容器

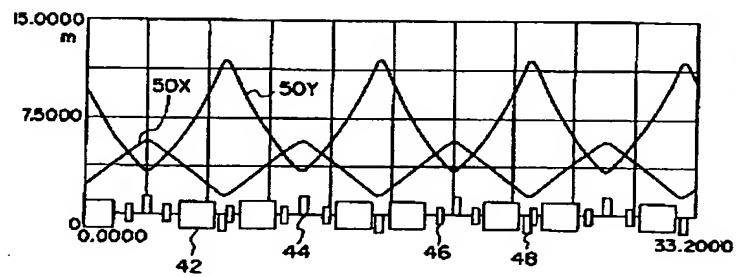
【図3】



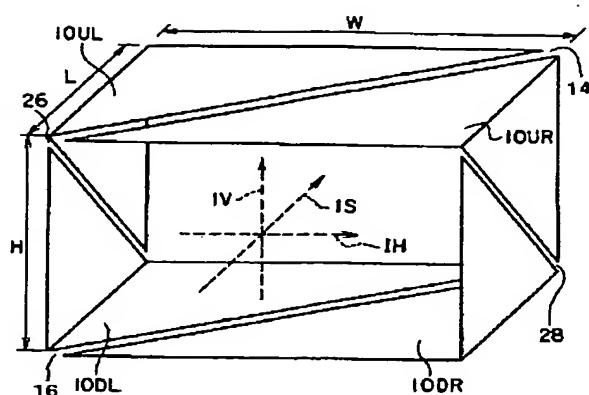
【図4】



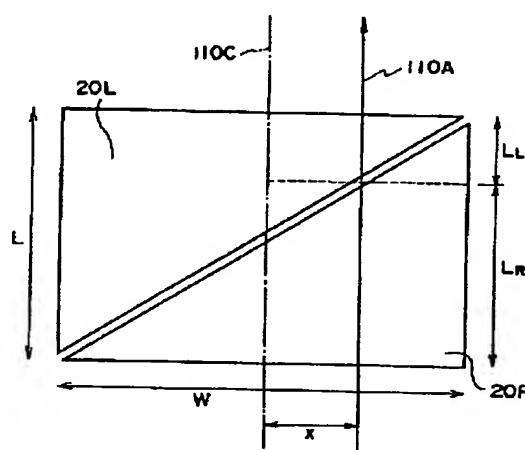
【図5】



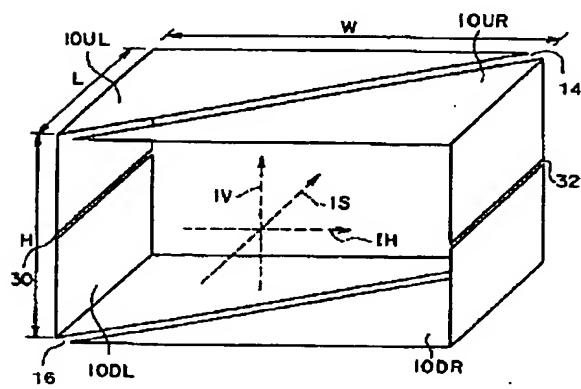
【図6】



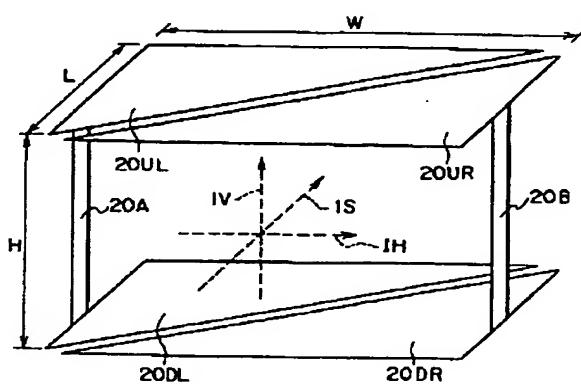
【図11】



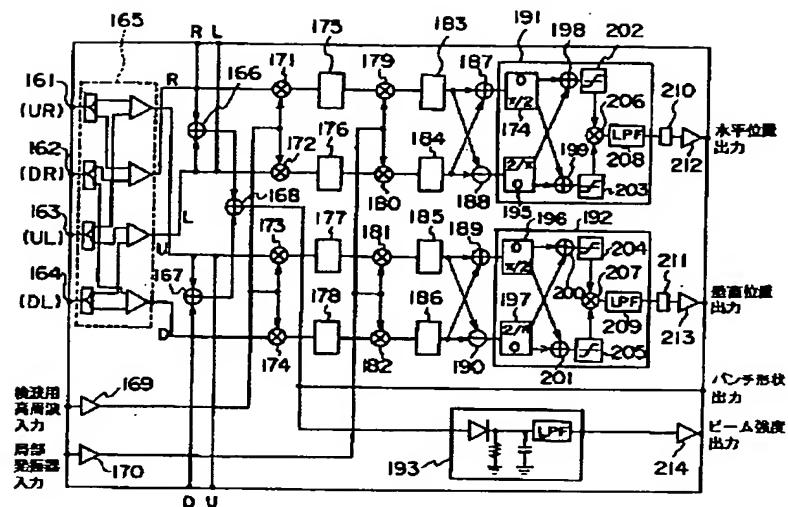
【図7】



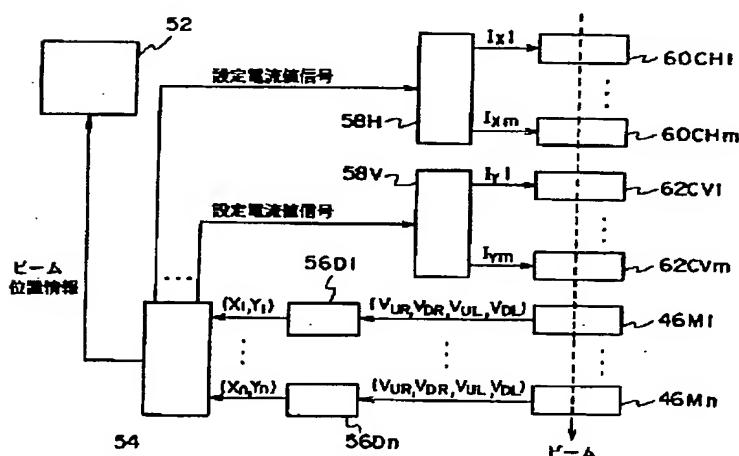
【図12】



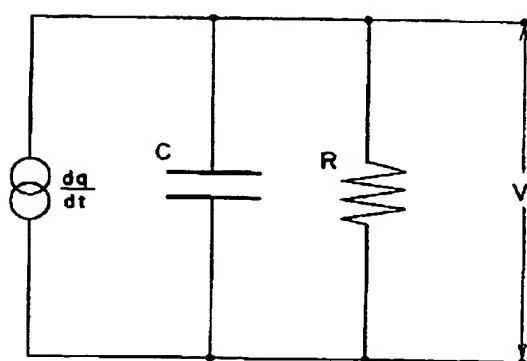
【図8】



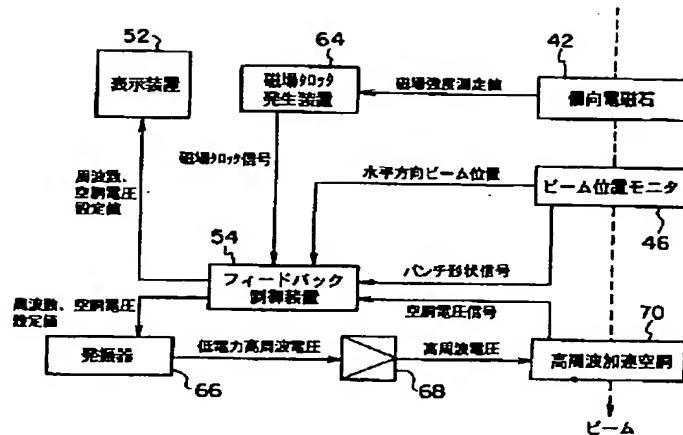
【図9】



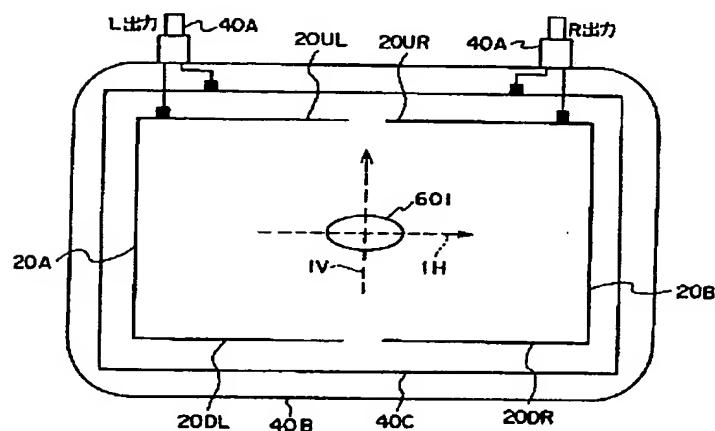
【図15】



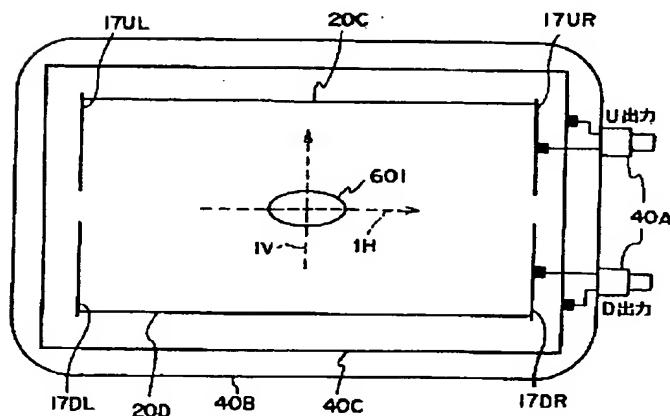
[図10]



[図13]



[図14]



フロントページの続き

F ターム(参考) 2G085 AA13 BA05 BA14 CA02 CA15  
CA16 CA17 CA20 CA26 CA27  
2G088 FF12 FF14 GG25 GG30 JJ01  
KK06 KK07 KK24 KK29 KK32  
KK35

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**